



## พฤติกรรมของโครงสร้างระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกน

ทงศักดิ์ อิ่มใจ\* และ จิราวัฒน์ พุ่มเกษร

หน่วยวิจัยนวัตกรรมการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-6146-2510 อีเมล: thanongsak\_im@rmutto.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.05.002

รับเมื่อ 7 มกราคม 2561 ตอรับเมื่อ 19 มีนาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 7 พฤษภาคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงภายใต้แรงกระทำร่วมคือแรงดัดตามแนวแกนและแรงดัดของระบบผนังคอมโพสิตแบบผสม พัฒนาออกที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ผนังคอมโพสิตแบบผสมนี้ประกอบไปด้วยวัสดุประกบภายนอก (Sandwich Panel) เป็นไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ด และแกนกลาง (Core Material) ซึ่งเป็นคอนกรีตผสมเม็ดโฟมโพรียูรีเทน (Expandable Polystyrene; EPS) ภายในจัดเรียงเป็นต่อเนื่องเป็นลักษณะวาฟเฟิล การทดสอบประสิทธิภาพของการรับแรงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างของผนังต้นแบบภายใต้แรงกระทำร่วมตามแนวแกนและแรงดัด จำนวน 16 ตัวอย่าง มีความหนา 100 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็น สองชนิด คือ Type A คือไม่มีโครงเหล็กเป็นแกนกลาง และ Type B มีโครงเหล็กกริดเย็น C75x45 เป็นแกนกลาง พบว่าค่าการแอ่นตัวของผนัง ชนิด Type A มีค่าสูงกว่าชนิด Type B เมื่อพิจารณาที่ค่าน้ำหนัก  $P_2$  เท่ากัน เนื่องจากผนังชนิด Type B มีเหล็กกริดเย็นอยู่บริเวณแกนกลาง จึงมีค่า Stiffness สูงกว่าแบบชนิด Type A และค่าน้ำหนักที่วิบัติของผนังแบบ Type B มีค่าสูงกว่า Type A เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่ภาวะใช้งาน (Serviceability Load) ของผนังทดสอบ Type A และ Type B มีค่าเท่ากับ 1.22 kN และ 2.04 kN ตามลำดับ (Type B คิดเป็น 1.2 เท่าของ Type A) จากผลการทดสอบผนังตัวอย่างภายใต้แรงกระทำร่วม คือ แรงดัดตามแนวแกนและแรงดัด และเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่าน้ำหนักในภาวะใช้งาน (Serviceability Load) ต่อกับค่าน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load) พบว่าค่าเฉลี่ย Serviceability Load/Load at Failure (%) ของตัวอย่างผนังทดสอบ ชนิด Type A และ Type B มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.2 และ 36.7 ตามลำดับ ดังนั้นจึงพิจารณากำหนดตัวคูณลดกำลัง ( $\phi$ ) เท่ากับ 0.3 ในแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (P-M Interaction Diagram) ระหว่างแรงดัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของโครงสร้างผนังคอมโพสิตเพื่อให้ผลการวิเคราะห์และออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

**คำสำคัญ:** ระบบผนังแบบคอมโพสิตแบบผสม, ผนังรับแรง, ผนังแซนวิช, ผนังอินฟิลวอลล์, โฟมคอนกรีต, แผนภูมิปฏิสัมพันธ์

การอ้างอิงบทความ: ทงศักดิ์ อิ่มใจ และ จิราวัฒน์ พุ่มเกษร, “พฤติกรรมของโครงสร้างระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 4, หน้า 777-787, ต.ค.-ธ.ค. 2561.

## Behaviour of Structural Composite Hybrid Panels under Combined Bending and Axial Compression Loads

Thanongsak Imjai\* and Jirawat Phumkesorn

Construction Innovation Research Unit (CIRU), Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08-6146-2510, E-mail: thanongsak\_im@rmutto.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.05.002

Received 7 January 2018; Accepted 19 March 2018; Published online: 7 May 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research deals with performance studies of load bearing hybrid composite walls under combined bending and axial compression loads developed at Rajamangala University of Technology Tawan-Ok. The hybrid composite wall consists of fiber cement board as a sandwich-board and light-weight foamed concrete mixed with Expandable Polystyrene foam (EPS) in waffle-arrangement as a core material. The testing programme includes sixteen structural composite panels and were tested under a combination of axial compression and flexural bending loads. Tested specimens were divided into two types; type A - without a steel skeleton and type B - with a cold-form C75×45 skeleton placed in the middle of the panel. Based on the test results, it was found that deflections of panels type A were higher than that of specimen type B due to the presence of a steel skeleton. The maximum failure loads of panel specimen type B exhibited higher loads than that of specimen type A. This is because the presence of cold-form steel in specimen type B caused a higher stiffness and thus a higher load bearing capacity. Moreover, it is also found that the serviceability loads of panel type A and type B are 1.22 kN and 2.04 kN, respectively. Based on the analysis of the test results, the P-M interaction diagram can be obtained by considering the reduction factor for the design procedure. For conservative design, the reduction factor ( $\phi$ ) = 0.3 is recommended by comparing the ratio between serviceability load and load at failure which are 31.2% and 36.7% for specimens type A and type B, respectively.

**Keywords:** Hybrid Wall, Load Bearing Wall, Sandwich Wall, Infill Wall, Foamed Concrete, Interaction Diagram

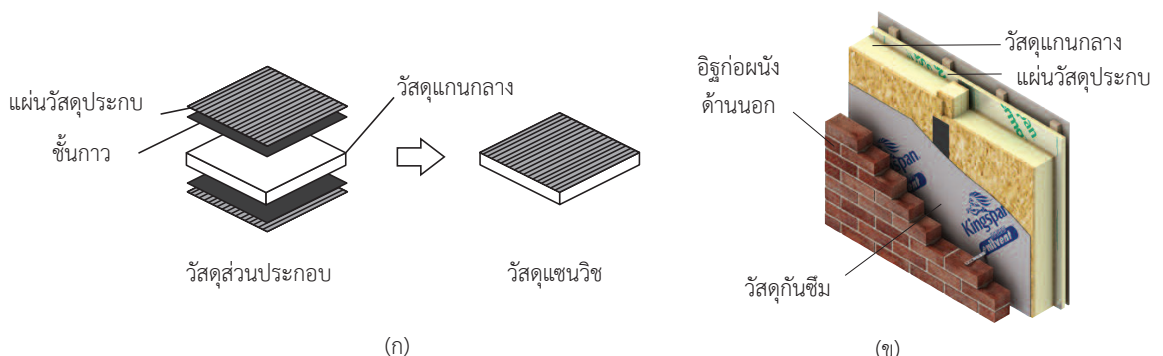
## 1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้ระบบผนังคอมโพสิตในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เช่น อาคารสูง บ้านพักอาศัย หรือสำนักงาน สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว จากเดิมที่เคยทำผนังด้วยการก่ออิฐฉาบปูนซึ่งต้องมีขั้นตอนและต้องรอรยะเวลานานกว่าผนังจะใช้งานได้ การพิจารณาเลือกระบบผนังในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในปัจจุบัน ต้องคำนึงทั้งด้านคุณภาพของวัสดุผนังและระยะเวลาในการก่อสร้าง ซึ่งเหล่านี้จะถูกควบคุมด้วยการวิเคราะห์ต้นทุนในการก่อสร้างแต่ละประเภท [1], [2] ในการก่อสร้างอาคารในประเทศไทย การเลือกใช้ระบบผนังคอมโพสิตในการก่อสร้างอาคารจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างและได้วัสดุผนังที่สามารถควบคุมคุณภาพในทุกขั้นตอนการผลิตและการใช้งาน และระบบผนังคอมโพสิตยังสามารถช่วยป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับระบบผนังก่อสร้างด้วยวัสดุแบบดั้งเดิม [3]

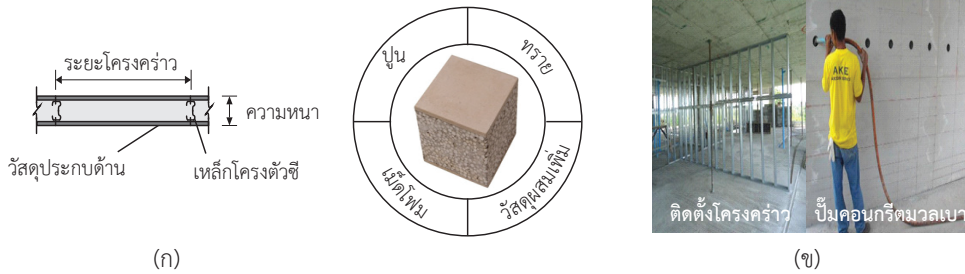
ระบบผนังคอมโพสิตแบบแซนวิช (Sandwich Insulated Panels) หรือเรียกว่า SIPs (รูปที่ 1) และระบบผนังหล่อในที่ (Infill Walls) (รูปที่ 2) ซึ่งระบบผนังคอมโพสิตทั้งสองประเภทมีขั้นตอนการติดตั้งต่างกัน และมีคุณสมบัติต่างกันตามวัสดุที่ใช้ ระบบผนัง SIPs มีคุณสมบัติการป้องกันไฟ การประหยัดพลังงาน มีน้ำหนักเบา ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง คุณสมบัติเด่นของระบบผนังนี้คือ มีโครงสร้างเบาเนื่องจากแกนกลาง (Core Material) เป็นวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักเบา เช่น โฟม Expanded Polystyrene (EPS), Extruded

Polystyrene (XPS) หรือ Urethane Foam (PU) และแผ่นประกบภายนอก (Sandwich Material) ที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้ระบบผนังคอมโพสิตประเภทนี้มีประสิทธิภาพถ่ายแรงโดยวัสดุยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุแกนกลางและแผ่นประกบภายนอก กล่าวคือแผ่นประกบจะรับแรงอัดและแรงดึง ส่วนแกนกลางจะรับแรงเฉือน (Composite Action) [4]–[8] อย่างไรก็ตาม ระบบผนังประเภท SIPs จะมีความสามารถในการรับแรงเฉือนต่ำกว่าระบบผนังคอมโพสิตประเภท Infill Walls เนื่องจากวัสดุแกนกลางของระบบผนัง Infill Walls นี้ใช้คอนกรีตผสมเม็ดโฟม ซึ่งมีผลจะทำให้ค่า Stiffness และความสามารถรับแรงเฉือนของผนังประเภทนี้สูงกว่า จากการศึกษาศึกษาโดย Thanongsak *et al.* [2], [9] พบว่าการใช้วัสดุแกนกลางเป็นคอนกรีตผสมเม็ดโฟมเพียงอย่างเดียวจะทำให้ผนังมีน้ำหนักสูงขึ้นใกล้เคียงกับระบบผนังบล็อกคอนกรีตมวลเบา และผลการศึกษาประสิทธิภาพด้านการป้องกันความร้อนต่ำกว่าระบบ SIPs เพราะระบบแกนกลางที่ใช้เป็นโฟม ประเภทโพรริยูรีเทน (EPS) แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าผนังก่อสร้างด้วยวัสดุแบบดั้งเดิม คือ ผนังดิน อิฐฉาบปูน บล็อกคอนกรีต และบล็อกคอนกรีตมวลเบา ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังวัสดุก่อสร้างของอาคารพักอาศัยในเขตร้อนชื้น [10]–[12]

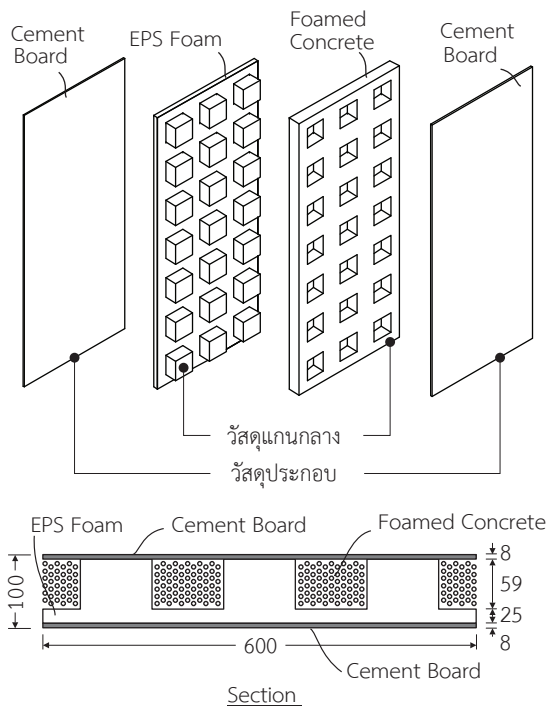
คณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบผนังแบบผสมระหว่างระบบ SIPs และ Infill Walls โดยได้พัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย [13], [14] ซึ่งเป็นผนังแบบคอมโพสิต แบบผสม



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบผนังแบบ SIP (ก) และ รูปแบบการติดตั้งผนัง SIPs ในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น (ข)



รูปที่ 2 ระบบผนัง Infill Wall (ก) วัสดุที่ใช้ในระบบผนัง และ (ข) การเทคอนกรีตผสมโฟมเป็นวัสดุแกนกลาง



รูปที่ 3 รายละเอียดระบบผนังคอมโพสิตแบบผสม (หน่วย มิลลิเมตร)

(Hybrid Wall) ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วย วัสดุประกบภายนอกซึ่งอาจทำมาจากไม้สังเคราะห์ (Oriented Strand Board; OSB) หรือวัสดุประเภทแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ (Fiber Cement Board) และวัสดุแกนกลางซึ่งเป็นโฟมตัน EPS จัดเรียงเป็นลักษณะวอลเฟิล กริด (Waffle Grid) แทรกอยู่ระหว่างคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดโฟม EPS ขนาด 3-5 มิลลิเมตร ซึ่งในแนวคิดการออกแบบมีการพิจารณา

ประสิทธิภาพของผนัง เช่น การป้องกันไฟ การประหยัดพลังงาน ความแข็งแรง ระยะเวลาการติดตั้ง สามารถติดตั้งร่วมกับงานระบบ โดยไม่สิ้นเปลืองวัสดุ โดยผลจากการศึกษาด้านทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยคณะวิจัย พบว่าระบบผนังประเภทนี้มีราคาวัสดุและแรงงานต่ำกว่าระบบผนังคอมโพสิตแบบ SIPs และ Infill Walls ลดระยะเวลาในการก่อสร้างและช่วยประหยัดพลังงาน [9], [13]

การออกแบบระบบผนังรับแรง เช่นระบบ SIPs จะพิจารณาค่าการโก่งตัวที่ยอมรับได้ (Deflection Limit) และน้ำหนักที่กำหนด (Weight Limit) ตามข้อกำหนดการออกแบบทั่วไป [15]-[18] และพิจารณาค่าการโก่งตัวในภาวะใช้งานอันเป็นผลจากการรับแรงกระทำร่วมนอกจากนั้นผู้ออกแบบต้องพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเฉพาะที่ (Local Compression) โดยหลักการคำนวณออกแบบ ผนังคอมโพสิตรับแรง (Load Bearing Wall) ที่มีแรงกระทำร่วมจากแรงดัด (Bending) และแรงอัดตามแนวแกน (Axial Compression) คือการกำหนดความหนาและการเลือกประเภทของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เหมาะสม [6], [19] โดยแนวทางการพัฒนาออกแบบระบบผนังแบบผสม คณะวิจัยได้พิจารณาเลือกวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในประเทศ และมีราคาไม่สูง เป็นวัสดุประกบภายนอกและวัสดุแกนกลาง สำหรับก่อสร้างตัวอย่างผนังคอมโพสิตต้นแบบ ในการศึกษาวิจัยนี้

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศและในประเทศ พบว่าไม่มีการนำระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมระหว่าง SIPs และ Infill Wall โดยรวมเอาจุดเด่นของทั้งสอง



ระบบมาประยุกต์เป็นผนังคอมโพสิตแบบใหม่เพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง [6], [15]–[19] นอกจากนั้นในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานในการออกแบบสำหรับระบบผนังคอมโพสิต ทั้งสองประเภทดังกล่าว โดยการออกแบบระบบผนัง SIPs จะอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างไม้ เช่น Eurocode 5 [20], BS EN 5268-2 [21], APA [18] ซึ่งไม่ได้ระบุแนวทางการออกแบบผนังคอมโพสิต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพโครงสร้างของผนังคอมโพสิตแบบผสมที่พัฒนาขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำร่วมและรูปแบบการวิบัติจากภาวะใช้งานจนถึงภาวะขีดสุดขอเขตการศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบผนังคอมโพสิตแบบผสมในการก่อสร้างต่อไป

การวิจัยนี้ คณะวิจัยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงของระบบผนังคอมโพสิตแบบผสม โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุสำหรับระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมในห้องปฏิบัติการ
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโครงสร้างระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมภายใต้แรงดัดและแรงอัดตามแนวแกน
- 3) เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบผนังคอมโพสิตแบบผสมจากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและแรงอัดตามแนวแกน

## 2. วิธีการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ระยะ โดยในช่วงระยะที่ 1 ดำเนินงานทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำผนังต้นแบบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM C365 [22], ASTM C364 [23], ASTM C393 [24] และ ASTM E72 [25] และระยะที่ 2 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงกระทำร่วมคือ แรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดสำหรับผนังต้นแบบ

### 2.1 ระยะที่ 1: การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

การศึกษาคูณสมบัติวัสดุที่ใช้ประกอบผนังในห้องปฏิบัติการ

แสดงในตารางที่ 1 ประกอบไปด้วยการทดสอบการรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างโฟม EPS ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นเท่ากับ 20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (1.25 ปอนด์ต่อตารางฟุต) พบว่าแรงอัดประลัยเฉลี่ย (Average Compressive Strength) ของตัวอย่างโฟม EPS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 MPa ที่ 5% Elongation และการทดสอบหาคุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดโฟม (FC) ใช้อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ดังนี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (OPC Type 1) จำนวน 50 กิโลกรัม ทรายหยาบจำนวน 25 กิโลกรัม น้ำปริมาณ 25 ลิตร เม็ดโฟมคละขนาด 3–5 มิลลิเมตร (สกัดส่วนคละจากโรงงานผู้ผลิต) จำนวน 1.4 กิโลกรัม และน้ำยาหน่วง (Foam Dispersing Agent) ปริมาณ 15 กรัม ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดประลัย ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 150×150×150 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัวอย่าง และรูปทรงกระบอกขนาด 150×300 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัวอย่าง และผลการทดสอบพบว่าค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย เท่ากับ 9.0 MPa และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุประกอบภายนอกคือ ไฟเบอร์ซีเมนต์ (CB) ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิตแสดงในตารางที่ 1

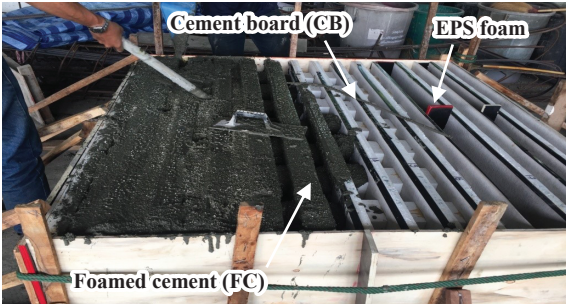
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุผนังต้นแบบ

Materials	$\sigma_c$ (MPa)	E (MPa)	$\rho$
CB	20	4500	0.20
EPS	0.10	2.00	0.08
FC	9.06	14240	0.18

Note: CB = Cement Board, EPS = Expanded Polystyrene Foam, FC = Foamed Concrete,  $\sigma_c$  = Averaged Compressive Strength, E = Modulus of Elasticity and  $\rho$  = Poisson's Ratio

### 2.2 ระยะที่ 2: การทดสอบประสิทธิภาพโครงสร้าง

ในระยะที่ 2 ผู้วิจัยเตรียมตัวอย่างแผ่นผนังคอมโพสิตแบบผสม มีความกว้าง 600 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 2400 มิลลิเมตร จำนวน 16 ตัวอย่าง แบ่งเป็นสองชนิด Type A เป็นแผ่นผนังต่อเนื่อง ไม่มีโครงเหล็กแกนกลาง และ Type B เป็นการจำลองโครงสร้างช่วงผนังบริเวณรอยต่อโดยมีโครงเหล็กกรีดเย็น (Cold-form Section) ขนาด C75×45

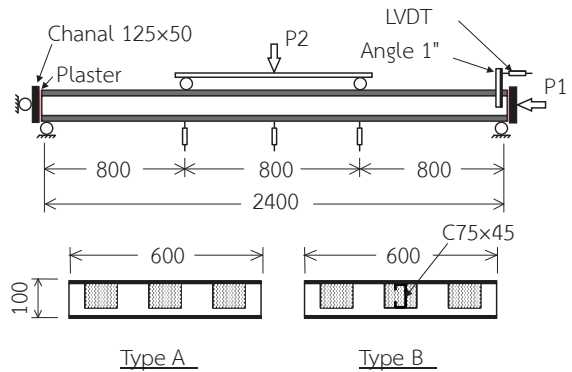


รูปที่ 4 ขั้นตอนการเทคอนกรีตผสมเม็ดโฟมลงในแบบหล่อสำหรับผนังต้นแบบ (ผนังคอมโพสิตแบบผสม)

เป็นแกนกลาง โดยผนังตัวอย่างทั้งสองประเภทมีวัสดุแกนกลาง (Core Material) เป็นโฟม EPS รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 100×100 มิลลิเมตรหนา 59 มิลลิเมตร มีระยะห่าง 100 มิลลิเมตร อยู่บนแผ่นโฟมหนา 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 และประกบด้านนอกด้วยแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ทั้งสองด้านด้วยกาวเฉพาะสำหรับติดผิวโฟม EPS จากนั้นทิ้งไว้ให้กาวแห้งใช้เวลาโดยประมาณ 24 ชั่วโมง และเทคอนกรีตผสมเม็ดโฟมตามอัตราส่วน ลงในช่องว่างในแผ่นผนัง พร้อมใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเพื่อไล่ฟองอากาศซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่เหมาะสมและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นลักษณะวาวเฟิล (รูปที่ 4)

#### 2.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค

การวัดการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้ Linear Voltage Transducers (LVDTs) มีความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ทำการติดตั้งอุปกรณ์ LVDT จำนวน 3 ชุด ที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงแผ่นผนัง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่โครงสร้างผนังมีการแอ่นตัวมากที่สุดภายใต้แรงที่มากกระทำบนพื้นที่ผนังที่ทำการทดสอบ และบริเวณจุดรองรับด้านที่มีน้ำหนักมากกระทำ เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยการบันทึกค่าการแอ่นตัวจะเริ่มบันทึกไปที่เครื่องประมวลผลภายหลังจากการเพิ่มน้ำหนักแต่ละ Load Step เท่ากับ 0.5 kN ตามที่กำหนดไว้ (Load Control) และใช้ชุดอุปกรณ์เลเซอร์สำหรับตรวจวัดระยะแนวราบและแนวตั้ง เพื่อตรวจวัดการเสียรูปของผนังด้านหน้า เพื่อตรวจสอบค่าการแอ่นตัวกับที่ได้จากการตรวจวัดโดย LVDTs



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิคและการให้น้ำหนักทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)

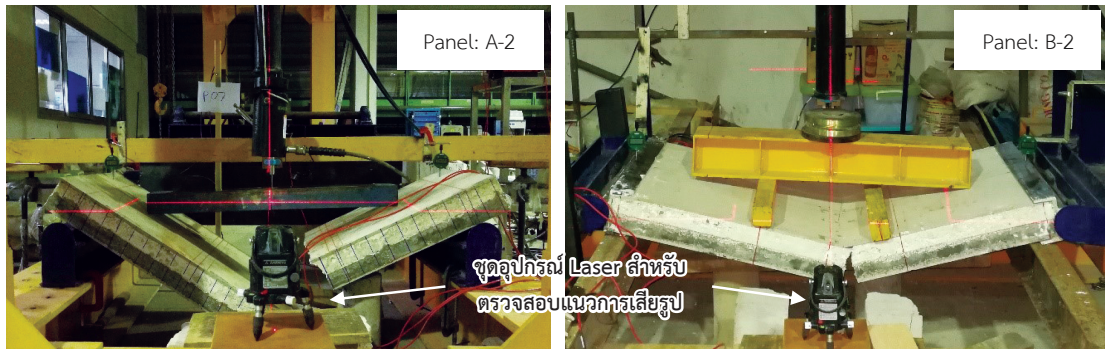
#### 2.2.2 ขั้นตอนการให้น้ำหนักและการประมวลผล

รายละเอียดการทดสอบผนังตัวอย่างภายใต้โมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกผนังทดสอบ

Panel ID	Axial Load ( $P_1$ )	Moment ( $P_2$ )	Remark
A-1,B-1	$P_{max}$	-	Uniaxial
A-2,B-2	$0.10 P_{max}$	Up to Failure	Combined
A-3,B-3	$0.15 P_{max}$	Up to Failure	Combined
A-4,B-4	$0.25 P_{max}$	Up to Failure	Combined
A-5,B-5	$0.50 P_{max}$	Up to Failure	Combined
A-6,B-6	$0.75 P_{max}$	Up to Failure	Combined
A-7,B-7	$0.90 P_{max}$	Up to Failure	Combined
A-8,B-8	-	Up to Failure	Moment

ในขั้นตอนการให้น้ำหนักกระทำร่วม ผู้วิจัยกำหนดค่าแรงอัดตามแนวแกนคงที่ในแต่ละตัวอย่างทดสอบ เช่น ทำการทดสอบผนังภายใต้แรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียวจะได้ค่า  $P_{max}$  และทำการกำหนดเป็นอัตราส่วนของ  $P_{max}$  เมื่อทำการทดสอบในรูปแบบแรงกระทำร่วม คือกำหนด  $P_1$  เท่ากับ 10%, 15%, 25%, 50%, 75% และ 90% ของ  $P_{max}$  ดังตารางที่ 2 เมื่อกำหนดค่าแรงอัดตามแนวแกน  $P_1$  คงที่ตามอัตราส่วนของ  $P_{max}$  ที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงใส่น้ำหนัก  $P_2$  ซึ่ง



รูปที่ 6 การวัดของตัวอย่างผนังที่ทดสอบภายใต้แรงดัดและแรงอัดตามแนวแกนของผนังตัวอย่างแบบ A-2 และ B-2

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบและค่าน้ำหนักที่ภาวะใช้งานสำหรับผนังตัวอย่างชนิด A

Panel ID	P1 (kN)	P2 (kN)	Axial (kN/m)	Moment (kN-m/m)	Mid-span Deflection (mm)	Serviceability Load (kN)	Serviceability Load/ Load at Failure (%)	Failure Mode
A-1	70.0	0.0	116.7	0.0	12.2	-	n/a	Buckling
A-2	7.0	5.9	11.7	3.9	34.4	1.28	21.7	Bending
A-3	10.5	5.4	17.5	3.6	31.8	1.28	23.7	Bending
A-4	17.5	5.3	29.2	3.5	32.3	1.20	22.6	Bending
A-5	35.0	4.5	58.3	3.0	27.7	1.24	27.6	Bending
A-6	52.5	3.5	87.5	2.3	21.3	1.22	34.9	Bending
A-7	63.0	1.7	105.0	1.1	13.4	1.12	65.9	Bending
A-8	0.0	6.0	0.0	4.0	37.0	1.21	20.2	Bending
Average					26.3	1.22	31.2	

เป็นแรงดัด จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ โดยผลการบันทึกค่าแรง  $P1$  และ  $P2$  พร้อมทั้งการแอ่นตัวจะประมวลผลแบบ Real Time ผ่านชุดอุปกรณ์ Data Logger BDI รุ่น STS4 (max. sampling rate = 1 kHz) ซึ่งสามารถแสดงผลการตรวจวัดผ่านคอมพิวเตอร์ได้ขณะทำการทดสอบ โดยกำหนดความถี่ของช่วงการบันทึกข้อมูล (Sampling Rate) เท่ากับ 5 Hz (บันทึก 5 ค่าต่อวินาที)

### 3. ผลการทดสอบ

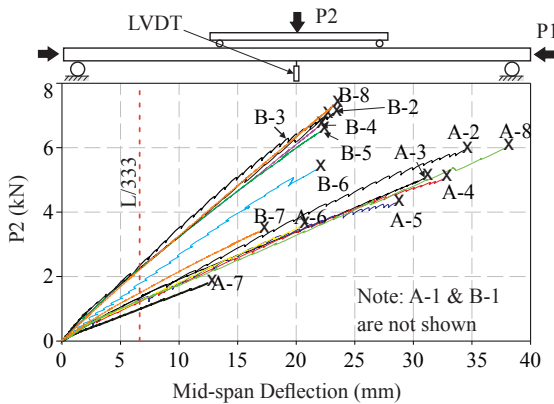
จากการทดสอบในระยะที่ 2 พบว่าตัวอย่างผนังทดสอบที่รับแรงกระทำร่วม (A-2 ถึง A-8 และ B-2 ถึง B-8) มีการหักช่วงกลางแผ่น (วิบัติแบบ Bending) ดังแสดงตัวอย่างการวิบัติของตัวอย่าง A-2 และ B-2 ในรูปที่ 6 และตัวอย่างผนังทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว (A-1 และ

B-1) วิบัติแบบโก่งเดาะ (Buckling) และค่าน้ำหนักสูงสุดที่ผนังวิบัติแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ประกอบไปด้วยแรง  $P1$  คือ แรงอัดตามแนวแกน  $P2$  คือ แรงกระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นผนังทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ในตัวผนังซึ่งจะเท่ากับ  $0.8P2/2$  และค่าการแอ่นตัว (Mid-span Deflection) ที่กลางคาน ในส่วนของการคำนวณแรงตามแนวแกน (Axial) และโมเมนต์ดัด (Moment) จะพิจารณาต่อเมตร (ความกว้างหน้าตัดของผนังตัวอย่าง) และค่าน้ำหนักที่ภาวะใช้งาน (Serviceability Load) โดยพิจารณาที่การแอ่นตัวของผนังเท่ากับค่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน Eurocode 5 [20] และ BS 5268-2 [21] ซึ่งกำหนดค่าน้ำหนักที่ภาวะใช้งาน (Short-term Serviceability Load) =  $P@ L/333$

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการแอ่นตัวของผนังตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ทั้ง 16 แผ่น (ผนัง A-1 และ B-1

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบและค่าน้ำหนักที่ภาวะใช้งานสำหรับผนังตัวอย่างชนิด B

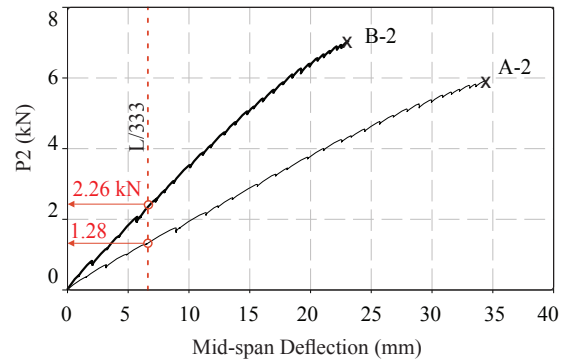
Panel ID	P1 (kN)	P2 (kN)	Axial (kN/m)	Moment (kN-m/m)	Mid-span Deflection (mm)	Serviceability Load (kN)	Serviceability Load/ Load at Failure (%)	Failure Mode
B-1	78.0	0.0	130.0	0.0	10.2	-	n/a	Buckling
B-2	8.7	7.1	14.5	4.7	25.7	2.26	31.8	Bending
B-3	13.1	6.8	21.8	4.5	24.6	2.2	32.4	Bending
B-4	21.8	6.3	36.3	4.2	22.9	2.21	35.1	Bending
B-5	43.5	5.4	72.5	3.6	19.7	2.21	40.9	Bending
B-6	54.0	4.7	90.0	3.1	24.6	1.80	38.3	Bending
B-7	69.0	3.0	115.0	2.0	17.6	1.45	48.3	Bending
B-8	0.0	7.2	0.0	4.8	24.2	2.20	30.6	Bending
Average					21.2	2.04	36.7	



รูปที่ 7 ค่าแอนตัวของผนังทดสอบภายใต้แรงดัดและแรงอัดตามแนวแกน

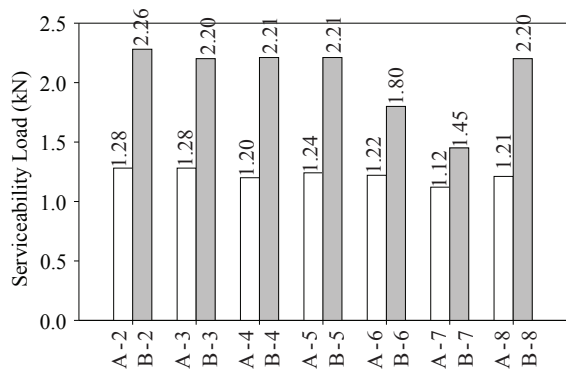
เป็นการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว พบว่าค่าการแอนตัวของผนัง ชนิด Type A มีค่าสูงกว่าชนิด Type B เมื่อพิจารณาที่ค่าน้ำหนัก P2 เท่ากัน เนื่องจากผนังชนิด Type B มีเหล็กกริเยนอยู่บริเวณแกนกลาง จึงมีค่า Stiffness สูงกว่าแบบชนิด Type A ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ค่าน้ำหนักที่วิบัติของผนังแบบ Type B มีค่าสูงกว่า Type A (ตารางที่ 3 และ 4)

ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกที่ภาวะใช้งานพิจารณาจากการแอนตัวที่มาตรฐาน Eurocode 5 [20] และ BS 5268-2 [21] โดยพิจารณาค่าแรง P2 ที่ผนังทดสอบมีการแอนเท่ากับ L/333 (7.20 มิลลิเมตร) แสดงในรูปที่ 8 สำหรับตัวอย่างทดสอบ A-2 และ B-2 จะพบว่าค่าน้ำหนักที่ภาวะ



รูปที่ 8 ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ภาวะใช้งานพิจารณาจาก 8 ค่าการแอนตัวเท่ากับ L/333

ใช้งาน (Serviceability Load) เท่ากับ 1.28 kN และ 2.26 kN สำหรับ Type A และ Type B ตามลำดับ (B-2 คิดเป็น 1.7 เท่าของ A-2) และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่ภาวะใช้งาน (Serviceability Load) ของผนังทดสอบ Type A และ Type B มีค่าเท่ากับ 1.22 kN และ 2.04 kN ตามลำดับ (Type B คิดเป็น 1.2 เท่าของ Type A) จึงสรุปได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทุกในภาวะใช้งานของตัวอย่างผนังทดสอบชนิด Type B มีค่าสูงกว่า Type A ทุกกรณี ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งในสภาพการติดตั้งผนัง รูปแบบโครงสร้างผนังจะเป็นแบบ Type B เนื่องจากผนังจะต้องมีการต่อทุกระยะ 600 มิลลิเมตร ก่อนทำการเทคอนกรีตลงในช่องว่าง ซึ่งคอนกรีตสามารถไหลผ่านเหล็กกริเยนอยู่บริเวณแกนกลางได้ ทำให้วัสดุแกนกลางที่เป็น



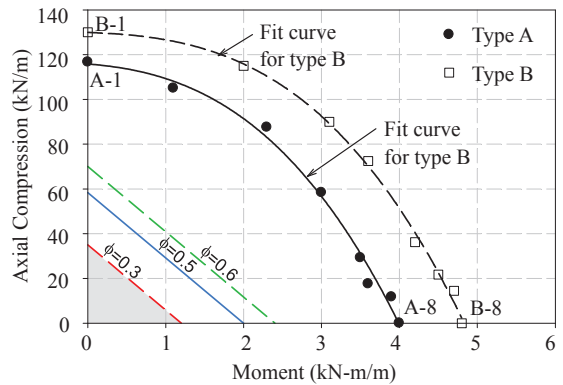
รูปที่ 9 คำนำน้หนักที่ภาวะใช้งาน (Short-term Serviceability Load) ของของผนังทดสอบ

คอนกรีตผสมเม็ดโพลีเมอร์มีการจัดเรียงกันแบบวาวเฟิล อย่างไรก็ตามในส่วนของการออกแบบจะพิจารณาใช้ค่าน้ำหนักที่ภาวะใช้งานของผนังชนิด Type A เพื่อให้ผลการวิเคราะห์เป็นไปในเชิงอนุรักษ์ (Conservative Design)

#### 4. การพัฒนาแผนภูมิออกแบบ

จากผลการทดสอบผนังตัวอย่างภายใต้แรงกระทำร่วมคือแรงอัดตามแนวแกนและแรงดัด ได้นำมาสร้างแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดตามแนวแกน และโมเมนต์ดัด (พิจารณาต่อเมตร) โดยทำการวิเคราะห์สมการ Fit Curve จากวิธี Method of Least Square เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและแรงอัดตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 10

การสร้างแผนภูมิในการออกแบบ กระทำโดยกำหนดตัวคูณลดกำลัง ( $\phi$ ) ซึ่งมาจากผลการวิเคราะห์เทียบอัตราส่วนระหว่างค่าน้ำหนักในภาวะใช้งาน (Serviceability Load) ต่อค่าน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load) แสดงในตารางที่ 3 และ 4 พบว่าค่าเฉลี่ย Serviceability Load/Load at Failure (%) ของตัวอย่างผนังทดสอบ ชนิด Type A และ Type B มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.2 และ 36.7 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราส่วน Serviceability Load/Load at Failure (%) ของตัวอย่างผนังทดสอบทั้งสองชนิด จึงกำหนดตัวคูณลดกำลัง ( $\phi$ ) เท่ากับ 0.3 สำหรับการออกแบบโครงสร้างผนังคอมโพสิต ดังนั้นการออกแบบผนังคอมโพสิตแบบผสมที่พัฒนาขึ้นใน



รูปที่ 10 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของผนังคอมโพสิตแบบผสม

การวิจัยนี้ จะใช้การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงกระทำร่วมเกิดขึ้นที่ผนังที่บริเวณต่างๆ และนำไปเทียบกับแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ที่กำหนดค่า  $\phi=0.3$  บริเวณพื้นที่สีเทา ในรูปที่ 10

#### 5. สรุป

ในการศึกษาวิจัยนี้ คณะวิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติวัสดุใช้ประกอบผนังและทำการทดสอบการรับกำลังแรงอัดประลัยตามแนวแกนของตัวอย่างผนังภายใต้แรงกระทำร่วม คือแรงอัดตามแนวแกนและแรงดัด ของตัวอย่างผนังคอมโพสิตแบบผสม แบ่งออกเป็น สองชนิด คือ Type A และ Type B เป็นการจำลองโครงสร้างช่วงผนังบริเวณรอยต่อโดยมีโครงเหล็กยึดเย็น (Cold-form Section) ขนาด C75x45 เป็นแกนกลาง ผลการทดสอบพบว่าค่าการแอ่นตัวของผนัง ชนิด Type A มีค่าสูงกว่าชนิด Type B เมื่อพิจารณาที่ค่าน้ำหนัก P2 เท่ากัน เนื่องจากผนังชนิด Type B มีเหล็กยึดเย็นอยู่บริเวณแกนกลาง จึงมีค่า Stiffness สูงกว่าแบบชนิด Type A ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ค่าน้ำหนักที่วิบัติของผนังแบบ Type B มีค่าสูงกว่า Type A

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างค่าน้ำหนักในภาวะใช้งาน (Serviceability Load) ต่อค่าน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load) มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.2 และ 36.7 สำหรับ Type A และ Type B ตามลำดับ จึงกำหนดตัวคูณลดกำลัง ( $\phi$ ) เท่ากับ 0.3 ในแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ สำหรับการออกแบบโครงสร้าง



ผนังคอมโพสิตเพื่อให้ผลการวิเคราะห์และออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

อย่างไรก็ตาม ระบบผนังคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นผนังต้นแบบ และยังไม่มีความมาตรฐานการออกแบบในประเทศไทย ดังนั้นการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพของระบบผนังประเภทนี้ในการรับแรงต่อเนื่อง หรือแรงกระทำแบบวัฏจักร เช่น แรงลม ซึ่งอาจมีผลทำให้โครงสร้างผนังเกิดการคืบ (Creep Effect) ควรมีการศึกษาในอนาคต

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผ่านมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2558 เลขที่สัญญา 152129

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Suksongyat, I. Chaisayun, A. Chankrapoe, P. Chanthawong, V. Vimanjan, and P. Namprakai, “Economical comparative analysis between house built using red clay bricks wall and aerated concrete wall for heat transfers and thermal properties,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 17 no. 2, pp. 34–42, 2007 (in Thai).
- [2] T. Imjai, J. Phumkesorn, and N. Chuthong, “Composite walls for industrial constructions in Thailand,” presented at the 11th Annual Concrete Conference, Nakhon Ratchasima, Thailand, Feb. 17–19, 2016 (in Thai).
- [3] T. Imjai, T. Ratanawan, and N. Kulaprapa, “Study of heat and moisture through a wall constructed using conventional and composite materials.” presented at the 22nd National Convention on Civil Engineering, Nakhon Ratchasima, Thailand, Jul. 18–20, 2017 (in Thai).
- [4] H. G. Allen, *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Pergamon Press, Oxford, 1969, pp. 283.
- [5] J. M. Dransfield, “Foamed concrete: Introduction to the product and its properties,” in One day awareness seminar on *Foamed concrete: properties, applications and potential*, University of Dundee, Scotland, 2000, pp. 1–11.
- [6] A. Kermani, “Performance of structural insulated panels,” *Journal of Buildings and Structures*, vol. 159, pp. 13–19, 2006.
- [7] M. Milner, “Health and safety evaluation of the SIP form of construction,” Timber Research and Development Association, London, 2002.
- [8] F. Tarlochan, S. Ramesh, and S. Harpreet, “Advanced composite sandwich structure design for energy absorption applications: Blast protection and crashworthiness,” *Composite Part B Engineering*, vol. 43, no. 5, pp. 2198–2208, 2012.
- [9] T. Imjai and J. Phumkesorn, “Hybrid composite UWalls for building constructions in Thailand,” presented at the 21st National Convention on Civil Engineering, Songkhla, Thailand, Jun. 28–30, 2016 (in Thai).
- [10] U. Sujisakulwong, “Thermal performance of masonry constructions for hot humid climate,” M.S. thesis, Architecture (Building Technology) Graduate School. Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2000. (in Thai).
- [11] B. Isarangkun Na Ayutthaya, P. Chanthawong, and Y. Ungkoon, “Study of hygrothermal performance of autoclaved aerated concrete mixed with sugar sediment and autoclaved aerated concrete walls under climate of bangkok,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 27, no. 4,





- pp. 19–24, 2010 (in Thai).
- [12] P. Chanthawong, V. Vimanjan, J. Khedari, and J. Hirunlabh, “Study of aerated concrete wall solar chimneys under the climate of Thailand,” *Journal of Applied Science*, vol. 8, no. 2, pp. 43–52, 2009 (in Thai).
- [13] T. Imjai and J. Phumkesorn, “Hybrid composite wall panels: development of uwalls and future challenge,” presented at the 7th Rajamangala University of Technology International Conference, Bangkok, Thailand, Aug. 24–26, 2016.
- [14] T. Imjai, “Hybrid composite uwall: From research to construction industry,” presented at the 10th Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Conference, Bangkok, Thailand, May. 29–31, 2017.
- [15] E. L. Keith, “APA Report T2006P-33, Standardization testing of structural insulated panels (SIPs) for the structural insulated panel association,” Gig Harbor, Washington, APA The Engineered Wood Association, Tacoma, Washington, 2006.
- [16] International Code Council (ICC), “Acceptance criteria for sandwich panels,” AC 04, IIC Evaluation Service, Inc., Whittier, California, 2007.
- [17] *Structural use of timber - code of practice for permissible stress design*, British Standard: BS 5268-2, 2002.
- [18] American Plywood Association (APA), “Design and Fabrication of Plywood Sandwich Panels,” Supplement No.4, Tacoma, WA, 1983.
- [19] P. Rungthonkit and J. Yang, “Behaviour of structural insulated panels (SIPs) under both short-term and long-term loadings,” in *proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*, Bath, UK. 2009.
- [20] *Design of timber structures—Part 1.1: General—Common rules and rules for buildings*, European Standard EC5, prEN 1995-1-1: 2003E. Eurocode 5, 2003.
- [21] *Structural use of timber - Code of practice for permissible stress design, materials and workmanship*, British Standards Institution. BS EN 5268-2, 2002.
- [22] *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*, ASTM C365-03, 2003.
- [23] *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*, ASTM C364-99, 1999.
- [24] *Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Construction*, ASTM C393-00, 2000.
- [25] *Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction*, ASTM E72-05, 2005.